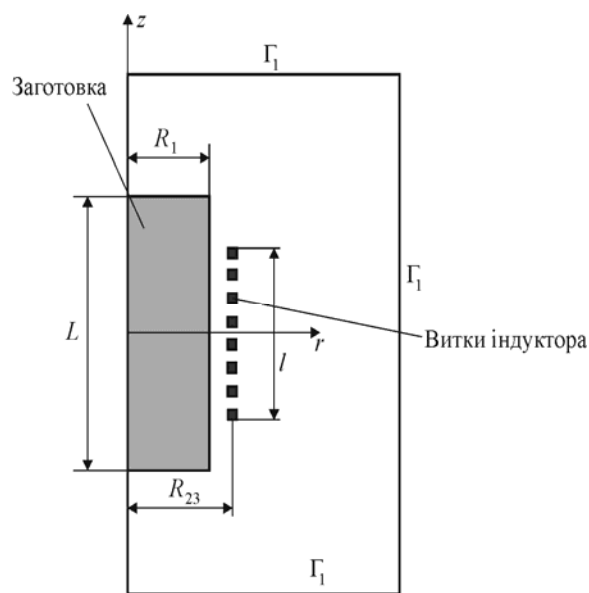
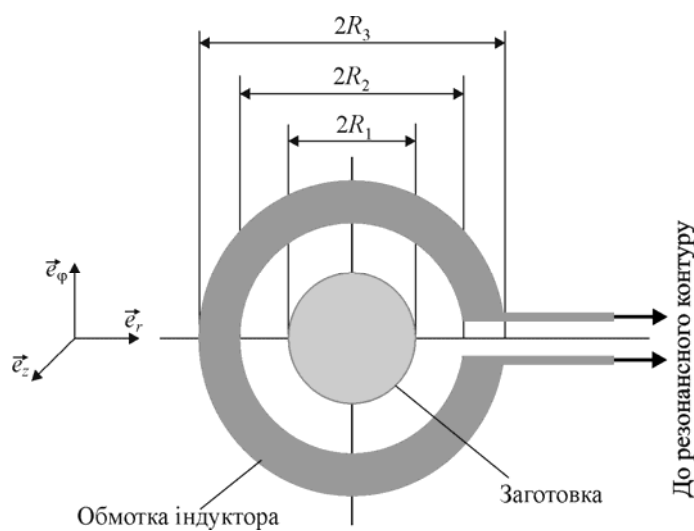


## РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ

Одним з проявів дії електромагнітного поля (ЕМП) на електропровідні тіла є тепловиділення згідно до закону Джоуля-Ленца. За деяких умов тепловиділення є достатньо інтенсивним, що призводить до значного зростання температури, яке може бути використане у технологічних цілях. Увесь великий клас операцій, заснованих на нагріванні заготовок за допомогою зовнішнього ЕМП прийнято називати індукційний нагрів. Для досягнення мети технологічної операції необхідно здійснювати вибір раціональних значень конструкційних та експлуатаційних параметрів технологічної системи, що базується на розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності. Неоднорідність поля температури у даному випадку обумовлена, у тому числі, наявністю розподілених джерел тепловиділення внаслідок виникнення неоднорідних вихрових струмів. Визначення інтенсивності розподілених джерел потребує визначення просторово-часової конфігурації ЕМП.

Розглянемо приклад розрахунку температурного поля під час індукційного нагріву об'ємного електропровідного тіла циліндричної форми за допомогою багатовиткового індуктору.



Дана задача у певних припущеннях може бути розв'язана аналітично для розрахункової схеми – рис. 1. Аналітичний розв'язок стосовно компонент ЕМП може бути відшукано згідно до схеми перетворення за Лапласом. Подібний спосіб розв'язання диференціальних рівнянь Максвела часто застосовується на

практиці [1, 2]. Проте подальше аналітичне визначення температури є потребує великих припущень, пов'язаних із нехтуванням реальними граничними умовами, внутрішньою теплопередачею у матеріалі та геометричною формою заготовки. Опускаючи проміжні перетворення, в кінцевому підсумку, знаходимо приріст температури зразка за час  $-\Delta t \gg \frac{2\pi}{\omega}$ :

$$\Delta T^\circ \approx \Delta t \frac{2\pi}{c\rho\gamma} \left( \frac{R_1}{l} \right) \left( \frac{NJ_m}{S} \right)^2, \quad (1)$$

де  $c$  – питома теплоємність;  $\rho$  – масова густина матеріалу;  $\gamma$  – питома електропровідність;  $J_m$  – амплітудне значення струму збудження;  $\omega$  – циклічна частота струму збудження;  $S$  – площа перерізу витка струмопроводу;  $N$  – кількість витків струмопроводу.

Дана формула (за усіх зроблених припущень та спрощень), фактично, дозволяє визначати залежність від часу температури у точці поверхні протяжної заготовки, що відповідає середині коаксіального індуктора.

Чисельне розв'язання поставленої задачі дозволяє уникнути багатьох із зроблених вище припущень. Воно також складається з двох етапів: визначення просторово-часового розподілу ЕМП та визначення нестационарного температурного поля. Постановка першої частини задачі, а також метод чисельного розв'язання описано у роботі [3]. Розв'язання задачі нестационарної теплопровідності із граничними умовами конвекційного теплообміну є еквівалентним задачі пошуку стаціонарного значення функціоналу температури:

$$\text{Temp} = \iint_S \left\{ \frac{K}{2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - QT + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} r dS + \int_{\Gamma_2} \frac{\alpha}{2} [T^2 - 2T_\infty T] r d\Gamma, \quad (2)$$

тут  $\Gamma_2$  – границя заготовки;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі;  $Q$  – питома потужність внутрішніх джерел тепловиділення:  $Q = \frac{1}{\gamma} j_\theta^2$ ;  $j_\theta$  – окружна компонента густини вихрового струму;  $\alpha$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну;  $T_\infty$  – температура зовнішнього середовища.

Було розглянуто приклад розв'язання для наступних вихідних даних. Заготовка розглядалась у вигляді суцільного циліндру, виготовленого із немагнітної сталі. Характеристики матеріалу: питома електропровідність –  $\gamma = 0,4 \cdot 10^6$  1/(Ом·м); питома теплоємність –  $c = 460$  Дж/(кг·град); густина речовини –  $\rho = 9000$  кг/м<sup>3</sup>. Геометричні параметри заготовки: довжина –  $L = 0,08$  м, радіус –  $R_1 = 0,025$  м. Індуктор вважався виготовленим із міді: питома електропровідність –  $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$  1/(Ом·м); питома теплоємність –  $c = 360$  Дж/(кг·град); густина речовини –  $\rho = 7500$  кг/м<sup>3</sup>. Геометричні параметри: довжина –  $\ell = 0,05$  м, радіус –  $R_{23} = 0,035$  м, кількість витків – 10, поперечний переріз витка – квадрат

(4×4 мм). Характеристики струму у індукторі: амплітуда струму 55 А; частота струму 50 кГц.

На рис. 3 та рис. 4 наведені просторові розподіли напруженості магнітного поля та сталої температури у заготовці. З рисунків видно, що температура має суттєво неоднорідний просторовий характер розподілу. Таким чином, представлений чисельний підхід до аналізу температурного поля, обумовленого індукційним нагріванням є більш адекватним у порівнянні із аналітичним підходом, результати якого можуть використовуватись лише як оціночні.

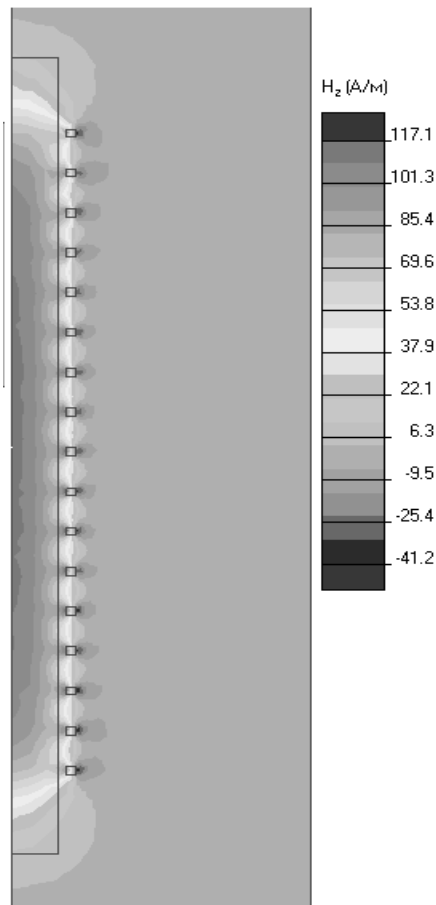


Рисунок 3

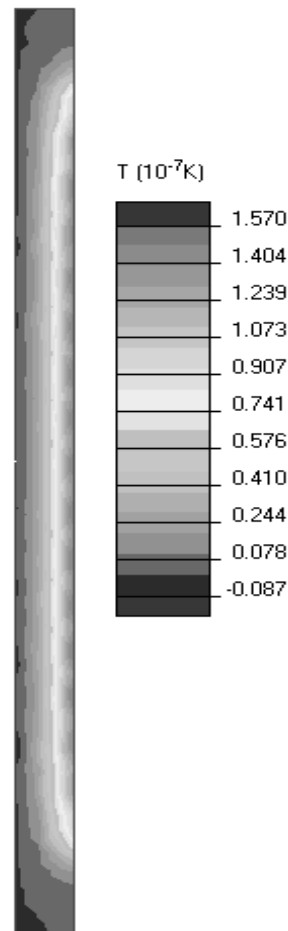


Рисунок 4

## ЛІТЕРАТУРА

1. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. – Харьков: Изд." МОСТ-Торнадо, 2002. – 284 с.
2. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Харків: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
3. Altenbach, H., Morachkovsky, O., Naumenko, K., & Lavinsky, D. (2016). Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 28(5), 1421-1433.